

Секция №7, устный

УДК 550.837

БЫСТРОПРОТЕКАЮЩАЯ ВЫЗВАННАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ В МЕРЗЛЫХ ОСАДОЧНЫХ ПОРОДАХ

Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю.

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск,

Рассматривается связь электрохимической поляризации на границе между минеральными зернами и поровым раствором с вызванной поляризацией горных пород, являющейся объектом изучения в методе ВП. Описание электрохимической поляризации дано в терминах зависящей от частоты поверхностной проводимости, которая контролируется удельной поверхностью, а та, в свою очередь, дисперсностью геологической среды. Показано, что при замерзании влажной дисперсной породы влияние поверхностной проводимости по сравнению с объемной становится преобладающим. Поэтому при изучении мерзлых пород нередко отмечаются проявления быстро протекающей вызванной поляризации.

Ключевые слова: мерзлые породы, вызванная поляризация, метод переходных процессов, низкочастотная диэлектрическая проницаемость, поверхностная проводимость.

Метод вызванной поляризации давно применяется при поисках рудных месторождений, решении задач гидрогеологии, а в последние два десятилетия – геоэкологии. Измерения проводят в частотной или временной областях, при этом обычно изучаются процессы ВП, время установления которых составляет от десятых долей секунды до первых секунд. Сравнительно недавно метод ВП начал применяться для изучения мерзлых толщ. Основанием для этого послужил тот факт, что в мерзлых осадочных породах наряду с «обычной», медленно устанавливающейся поляризацией наблюдаются быстро протекающие процессы ВП, характерное время установления которых составляет десятки – сотни мкс. Впервые на эти процессы обратили внимание при работах методом переходных процессов (МПП) в Якутии. Впоследствии они неоднократно отмечались в Якутии и других северных регионах как при съемках МПП, так и с использованием гальванических установок, а также в лаборатории [1, 2].

Большая часть оценок параметров быстропротекающей вызванной поляризации (БВП) получена путем инверсии индукционных переходных характеристик в терминах удельной электропроводности, описываемой формулой Коул-Коул:

$$\sigma^*(\omega) = \sigma_0 \frac{1 + (j\omega\tau)^c}{1 + (1-\eta)(j\omega\tau)^c},$$

где $j = \sqrt{-1}$; ω – круговая частота, рад/с; σ_0 – удельная электропроводность на постоянном токе, См/м; η – поляризуемость, c – показатель степени; τ – время релаксации, с. Диапазон возможных значений параметра η – от нуля до единицы, τ – от нуля до бесконечности. Параметр c может изменяться в пределах от 1 (одно время релаксации) до 0 (бесконечно широкое равномерное распределение времен релаксации).

Как выяснилось, мерзлые породы верхней части геологического разреза (ВЧР) Якутии отмечаются характерным набором поляризационных параметров, входящих в формулу Коул-Коул [2]. Удельное электрическое сопротивление $\rho = 1/\sigma$ составляет десятки – сотни Ом·м; поляризуемость заключена в диапазоне от 0.2 до 0.85, однако большая часть значений η попадает в интервал 0.2 – 0.5. Постоянная времени τ поляризационного процесса изменяется от 35 до 250 мкс, среднее значение τ составляет около 100 мкс. В отличие от η и τ показатель степени c в формуле Коул-Коул в большинстве случаев близок к единице. Тот факт, что $c \approx 1$, свидетельствует об узком распределении времен релаксации; по существу, поляризационный переходный процесс может быть описан одной убывающей экспонентой с постоянной времени τ , т.е. *дебаевской* моделью.

Как известно, относительная диэлектрическая проницаемость (точнее, ее реальная составляющая, ε'), следующим образом связана с мнимой составляющей удельной электропроводности (σ''): $\varepsilon' = \sigma'' / (\omega \varepsilon_0)$, где ε_0 – диэлектрическая постоянная ($8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м). При пересчете мнимой составляющей удельной электропроводности, соответствующей приведенным выше параметрам модели Коул-Коул, получается, что на частотах ниже 1кГц значения ε' составляют первые десятки тысяч – первые сотни тысяч [2].

По поводу механизмов, объясняющих быстропротекающую вызванную поляризацию мерзлых ионно-проводящих пород, высказываются разные предположения. Чаще всего упоминаются такие явления как диэлектрическая релаксация льда и/или межповерхностная поляризация (эффект Максвелла-Вагнера). Модели поляризации среды, основанные на этих явлениях, предсказывают частотную дисперсию диэлектрической проницаемости в диапазоне, который согласуется с результатами полевых и лабораторных измерений. Однако значения ε' , которые дают эти модели, на четыре порядка меньше по сравнению с найденными в результате инверсии данных МПП [2]. В такой ситуации не остается ничего другого, как предположить, что вызванная поляризация влажных ионно-проводящих пород, при измерениях в частотной области проявляющаяся как частотная дисперсия электропроводности и/или диэлектрической проницаемости, связана преимущественно с *электрохимическими явлениями* на границе между твердой (минеральная матрица) и жидкой (порový раствор) фазами.

Относительный вклад эффектов, связанных с процессами электрохимической поляризации, контролируется: 1) отношением поверхности компонентов к их объему (удельной поверхностью); 2) поверхностными и объемными физическими и химическими свойствами компонентов; 3) особенностями связи между процессами поверхностной и объемной поляризации; 4) характеристиками двойного электрического слоя на границе твердой и жидкой фаз; 5) геометрической, химической и электрической гетерогенностью границ раздела между фазами. Поляризация влажной породы может происходить с участием всех перечисленных механизмов (в разных сочетаниях и пропорциях). Очевидно, создание достаточно полной модели с учетом всех механизмов поляризации, которые оказывают друг на друга взаимное влияние, представляет непростую задачу и является делом будущего. В этой ситуации привлекает внимание подход, согласно которому полная проводимость породы представляет собой сумму объемной и поверхностной проводимостей [4]. Эффективная комплексная удельная электропроводность (УЭП) элемента горной породы зависит от частоты и определяется выражением,

$$\sigma^*(\omega) = (\sigma_{об} + j\omega\varepsilon_\infty) + [\sigma'_{пов}(\omega) + j\sigma''_{пов}(\omega)] ,$$

где $\sigma_{об}$ и ε_∞ – объемная (низкочастотная) удельная электропроводность и высокочастотная диэлектрическая проницаемость, а $\sigma'_{пов}(\omega)$ и $\sigma''_{пов}(\omega)$ – реальная и мнимая составляющие поверхностной УЭП. Группируя в приведенном выше выражении реальные и мнимые компоненты, получаем

$$\sigma^*(\omega) = [\sigma_{об} + \sigma'_{пов}(\omega)] + j[\omega\varepsilon_\infty + \sigma''_{пов}(\omega)] .$$

В рамках рассматриваемой модели мнимая составляющая удельной электропроводности определяется преимущественно эффектами поверхностной проводимости. Что касается синфазной составляющей, то в нее вносят вклад как поверхностная, так и объемная проводимость. Параметры $\sigma_{об}$ и ε_∞ , которые характеризуют объемные свойства среды, не зависят от частоты и могут быть рассчитаны на основе модели эффективной среды. Низкочастотная УЭП водонасыщенной породы может быть оценена по формуле

$$\sigma_{об} = \sigma_\varepsilon k_n^m ,$$

где σ_ε – удельная электропроводность порового раствора, k_n – пористость, m – индекс цементации, определяемый эффективной формой зерен. Это соотношение известно как закон Арчи. Высокочастотная диэлектрическая проницаемость может быть найдена на основе модели Ханая-Бруггемана путем решения уравнения

$$\varepsilon_{\infty} = \varepsilon_{\text{в}} K_{\text{п}}^m \left(\frac{1 - \varepsilon_{\text{мз}} / \varepsilon_{\text{в}}}{1 - \varepsilon_{\text{мз}} / \varepsilon_{\infty}} \right)^m,$$

где $\varepsilon_{\text{в}}$ и $\varepsilon_{\text{мз}}$ – диэлектрические проницаемости порового раствора и минеральных зерен, соответственно.

Вследствие электрохимической поляризации на границе между минеральной матрицей и поровым раствором комплексная поверхностная проводимость $\sigma_{\text{пов}}^*(\omega)$ зависит от частоты. Когда $\omega \rightarrow 0$, диэлектрическая проницаемость приближается к постоянному значению $\varepsilon_{\text{с}}$, мнимая компонента поверхностной проводимости стремится к нулю, тогда как синфазная – к постоянному значению $\sigma'_{\text{пов}}(0)$. Поверхностная УЭП на постоянном токе определяется как [4]

$$\sigma'_{\text{пов}}(0) = \lim_{\omega \rightarrow 0} \sigma'_{\text{пов}}(\omega) = \frac{e \mu_{\text{с}} \Sigma_0 S_0}{f_g},$$

где e – заряд электрона, $\mu_{\text{с}}$ – эффективная подвижность поверхностных ионов, Σ_0 – плотность зарядов на поверхности минералов, S_0 – средневзвешенная удельная поверхность, f_g – геометрический фактор, характеризующий «извилистость» границы между зёрнами и порами. При увеличении частоты реальная и мнимая компоненты поверхностной УЭП возрастают.

Согласно [3] комплексная поверхностная УЭП на произвольной частоте может быть представлена как произведение статической поверхностной электропроводности на спектральную функцию отклика $J^*[\omega, g(r), \mu_{\text{с}}]$:

$$\sigma_{\text{пов}}^*(\omega) = \frac{e \mu_{\text{с}} \Sigma_0 S_0}{f_g} J^*[\omega, g(r), \mu_{\text{с}}]. \quad (1)$$

$J^*[\omega, g(r), \mu_{\text{с}}]$ представляет собой свертку электрохимической поляризации фиксированной и диффузионной частей двойного электрического слоя на поверхности зерна/поры радиусом r с распределением $g(r)$ размеров зерен/пор. Модуль комплексной поверхностной электропроводности определяется главным образом произведением S_0 , Σ_0 и $\mu_{\text{с}}$, а частотная зависимость (дисперсия) – распределением размеров зерен/пор.

В области низких (0.01 Гц и менее) частот σ'' стремится к нулю при $\omega \rightarrow 0$, тогда как ε' , асимптотически приближаясь к низкочастотному пределу $\varepsilon'_{\text{с}}$, остается практически постоянной. На частотах свыше 0.1 МГц ε' стремится к высокочастотному пределу (ε'_{∞}), а σ'' возрастает пропорционально частоте.

Согласно (1) σ'' пропорциональна удельной поверхности, поэтому можно предположить, что особенно большие значения низкочастотной диэлектрической проницаемости характерны для дисперсных пород, например, содержащих большое количество частиц глинистой фракции. Согласно литературным данным породы ВЧР Западной Якутии характеризуются значительной гетерогенностью. Некоторые осадочные породы палеозойского возраста содержат глинистые частицы, образующие прослои (глинистые известняки и доломиты) либо глинистый цемент (мергели, алевролиты, аргиллиты). Один из часто встречающихся компонентов ВЧР Мало-Ботуобинского алмазодобывающего района представлен туфами основного состава, которые также могут иметь высокую удельную поверхность.

Осадочные породы, такие как глины, суглинки, глинистые сланцы, песчаники и т.п. распространены очень широко. В этой связи уместно задать вопрос: почему же при съемках МПП массовые проявления ВПИ наблюдаются именно в Якутии? Вероятное объяснение заключается в том, что одни и те же породы в зависимости от того, находятся ли они в мерзлом или не мерзлом состоянии, характеризуются разным соотношением эффектов поверхностной и объемной проводимости. На рис. 1а изображен элемент породы, включающий минеральные зерна и поровый раствор. При положительной температуре все поровое пространство заполнено проводящим раствором. В этом случае вклад объемной проводимости является преобладающим ($\sigma'' \ll \sigma'$), поэтому

поляризуемость, которая пропорциональна $\arctg(\sigma''/\sigma') \cong \sigma''/\sigma'$ [3, 4], мала, и, соответственно, эффекты ВП проявляются слабо.

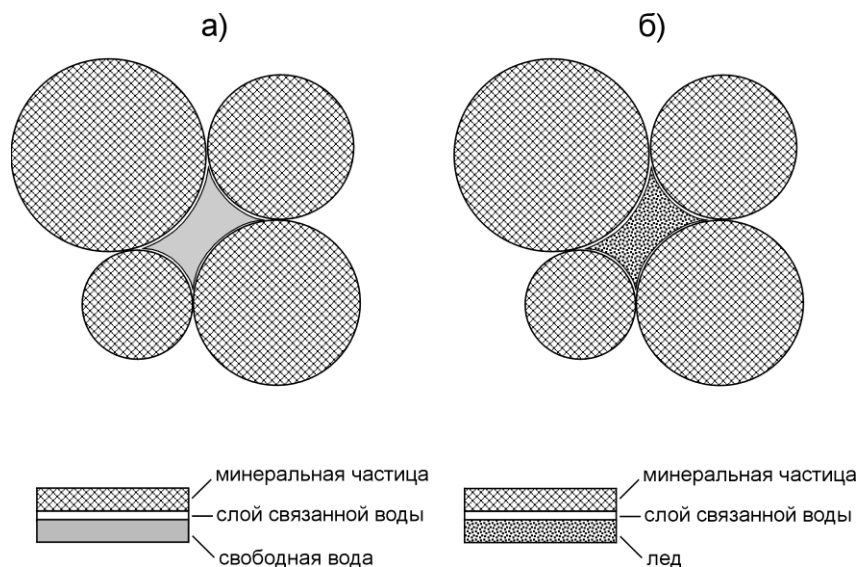


Рис. 1. Элемент объема водонасыщенной породы или грунта при температуре выше (а) и ниже (б) 0°C .

При температуре ниже 0°C раствор в порах превращается в лед, и лишь небольшая его часть в виде связанной или адсорбированной воды остается незамерзшей, образуя тонкую пленку на границе между минеральными зернами и поровым льдом (рис. 1б). Это приводит к резкому уменьшению объемной проводимости, вследствие чего УЭП породы в целом уменьшается в десятки – сотни раз. Что касается поверхностной проводимости, то она – в отличие от объемной – контролируется удельной поверхностью пор, которая не изменится при переходе породы в мерзлое состояние. Более того, поскольку на границе лед-вода протекают те же процессы, что и на границе минерал-вода, логично предположить, что в результате замерзания поровой воды удельная поверхность возрастает примерно в два раза (см. рис. 1б). Таким образом, после того, как вода в порах замерзла, эффекты поверхностной проводимости становятся заметными на фоне объемной проводимости, что проявляется как возрастание поляризуемости.

Что касается проявлению эффектов ВПИ при измерениях методом переходных процессов, имеется дополнительная причина, объясняющая, почему они отмечаются преимущественно в присутствии мерзлых пород: вследствие того, что при замерзании породы ее УЭП резко понижается, относительный вклад процессов становления вихревых токов уменьшается по сравнению с эффектами ВПИ, и уже ничто не мешает проявлению последних.

Литература

1. Агеев В.В. Изучение процессов вызванной поляризации для решения геокриологических задач // Разведка и охрана недр, 2011, №11, с. 46 – 49.
2. Kozhevnikov, N.O., Antonov, E.Yu., Fast-decaying inductively induced polarization in frozen ground: A synthesis of results and models, Journal of Applied Geophysics, 82, 2012, 171 – 183.
3. Lesmes, D.P., Dielectric spectroscopy of sedimentary rocks // Journal of Geophysical Research, Vol. 106, NO. B7, P. 13,329 – 13,346, JULY 10, 2001.
4. Lesmes D.P. and Frye K.M. Influence of pore fluid chemistry on the complex conductivity and induced polarization response of Berea sandstone // Journal of geophysical research, Vol. 106, NO B3, P. 4079 – 4090, MARCH 10, 2001.